

0- 784447

На правах рукописи



**БЕЛОКОПЫТОВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ВОГНУТЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ  
РЕШЕТОК, ЗАПИСАННЫХ НЕГОМОЦЕНТРИЧЕСКИМИ  
ПУЧКАМИ**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы  
и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева и ФГУП НПО «Государственный институт прикладной оптики».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Павлычева Н.К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Ильин Г.И.

доктор физ-мат наук, профессор  
Козлов В.К.

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт  
им. Е.К. Завойского (КФТИ)

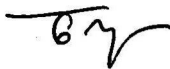
Защита состоится «01» ноября 2010 г. на заседании диссертационного  
совета Д212.079.06 в Казанском государственном техническом  
университете по адресу:

420015, г. Казань, ул. Толстого, д. 15, учебный корпус № 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского  
государственного технического университета

Автореферат разослан «28» сентября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бердников А.В.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы Анализ существующих оптических схем спектральных приборов показывает, что коррекционные возможности оптических схем с классическими дифракционными решетками практически исчерпаны, более перспективным является применение вогнутых неклассических дифракционных решеток, позволяющих создавать новые схемные решения.

Существенным недостатком классических вогнутых дифракционных решеток является наличие значительных aberrаций: астигматизма, дефокусировки, меридиональной и сагиттальной комы. Изготовление вогнутых голограммных дифракционных решеток (ВГДР) при помощи сферических волновых фронтов (запись точечными источниками) позволяет исправить дефокусировку, астигматизм и меридиональную кому. Однако для светосильных приборов и приборов с высокой дисперсией, качество изображения входной щели при использовании записи точечными источниками оказывается недостаточно, т.к. начинает сказываться влияние сагиттальной комы. Одним из наиболее эффективных средств повышения качества изображения, даваемого ВГДР в плоскости регистрации, является коррекция aberrаций на стадии записи дифракционной решетки за счет намеренного искажения волновых фронтов лазерных пучков. Высокую степень коррекции aberrаций обеспечивает запись ВГДР неомоцентрическими лучками, полученными, например, с помощью вогнутых зеркал (ВГДР 2-го поколения).

**Объект исследования** ВГДР с коррекцией aberrаций и спектральные приборы на их основе.

**Предмет исследования** методы расчета, изготовления и контроля оптических характеристик ВГДР с коррекцией aberrаций.

**Цель работы** Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчета, изготовления и контроля ВГДР 2-го

поколения и разработка на их основе оптической системы спектрального прибора с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками.

**Задачи работы** Для достижения указанной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Провести анализ литературных данных для выявления наиболее перспективных методов расчета и изготовления ВГДР с оптимизированными абберационными характеристиками.
2. Разработать программное обеспечение, отвечающее современным требованиям, для автоматизации расчетов схем записи ВГДР, оптических схем приборов на их основе и анализа их абберационных характеристик. Провести расчет оптической схемы спектрографа и параметров голографирования для записи ВГДР 2-го поколения, провести анализ степени влияния параметров голографирования на абберационные характеристики ВГДР.
3. Разработать методы и средства изготовления ВГДР 2-го поколения. Разработать методы и средства для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток.
4. Провести математическое моделирование оптических свойств спектрографа на основе ВГДР 2-го поколения. Изготовить ВГДР 2-го поколения и исследовать ее технические характеристики на макете спектрографа.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана схема записи ВГДР 2-го поколения, предназначенной для работы в спектрографе на круге Роуланда, с пространственной частотой 3600 штр/мм с применением двух цилиндрических зеркал.
2. Теоретически обоснованы требования к погрешностям расположения оптических элементов голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения.



3. Разработана методика юстировки оптической схемы записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая выполнение требований к погрешностям установки оптических элементов.
4. Предложена методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

**Достоверность результатов** подтверждается хорошим совпадением результатов расчетов с данными математического моделирования изображения спектра и экспериментальными данными.

**Практическая ценность работы** заключается в получении следующих результатов:

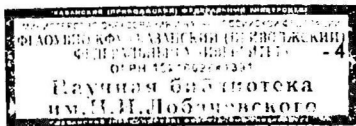
1. Создании современного программного обеспечения:
  - пакет программ «VGDR» для проведения расчетов оптических схем спектральных приборов и схем записи ВГДР;
  - программа расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения;
2. Разработанные голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения, методика юстировки схем записи ВГДР 2-го поколения, измерительный стенд для технологического контроля оптических характеристик голограммных дифракционных решеток позволяют получать ВГДР с высокой степенью коррекции аберраций.
3. Рассчитана оптическая схема малогабаритного эмиссионного спектрографа для анализа основных типов металлов, сплавов, горных пород и почв и схема записи ВГДР 2-го поколения для данного спектрографа.

4. Серийный выпуск спектроанализатора на основе разработанной оптической схемы спектрографа с ВГДР 2-го поколения может удовлетворить потребности производственных и исследовательских лабораторий в отечественных приборах с высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

**Реализация результатов работы.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы были внедрены и использованы в ФГУП НПО ГИПО, г. Казань. Разработанное программное обеспечение для автоматизации оптических расчетов применяется в учебном процессе на кафедре оптико-электронных систем Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Рассчитанная оптическая схема спектрографа легла в основу проектируемого ООО НПО «СЕТАЛ» спектроанализатора для эмиссионного анализа основных типов металлов, сплавов и почв.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Оптическая схема записи ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм на основе вогнутых цилиндрических зеркал, предназначенной для работы в спектрографе на круге Роуланда в диапазоне длин волн 190-360 нм.
2. Результаты расчета и анализа степени влияния погрешностей установки элементов схемы записи на абберационные характеристики ВГДР 2-го поколения.
3. Методика юстировки схемы записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая выполнение требований к погрешностям установки оптических элементов схемы записи ВГДР 2-го поколения.
4. Методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стенов для контроля оптических характеристик дифракционных



решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

**Личный вклад автора.** Автором рассчитана схема записи ВГДР 2-го поколения, проведен анализ влияния погрешностей установки оптических элементов схемы записи на абберационные характеристики спектрографа, проведено математическое моделирование спектрографа с ВГДР 2-го поколения. ВГДР 2-го поколения получена лично автором. Автором разработаны пакет программ «VGDR» и программа для расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения. При непосредственном участии автора разработаны голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения и измерительный стенд для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, проведены исследования оптических характеристик ВГДР. Автором предложен метод юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

18-ой международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения г.Москва 2004г., Международной конференции "Прикладная оптика" г.Санкт-Петербург 2004г., Международной конференции «Прикладная оптика 2008» г.Санкт-Петербург 2008г., Международной молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения» г.Казань 2009г., Международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения г.Саров 2008г., XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции г.Казань 2008 г.

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, одобренных ВАК, 6 публикаций материалов докладов, из которых 5 на Международных конференциях и 1 на Всероссийской конференции, и 1 патент РФ на изобретение.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет: 139 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 48 рисунков.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту, практическая ценность, апробация результатов, определены структура и объем работы, и приведено краткое содержание диссертации.

**В первой главе** представлен анализ современного уровня развития спектрального приборостроения и производства дифракционных решеток, в том числе со скомпенсированными аберрациями, приводится классификация спектральных приборов и наиболее часто применяемые оптические схемы, обсуждаются достоинства и недостатки этих схем применительно к многоканальному фотоэлектрическому способу регистрации спектра, представлен обзор современных спектральных приборов, составленный на основе анализа публикаций в научно-технической литературе и информации, размещенной на Internet-сайтах крупнейших производителей спектрального оборудования, приводится классификация дифракционных решеток,

описываются способы и некоторые аспекты технологии их изготовления, приводится список крупнейших мировых производителей.

Проведенный анализ показал, что наиболее перспективной для построения спектроанализаторов с высоким разрешением является схема Пашена-Рунге (рис.1).

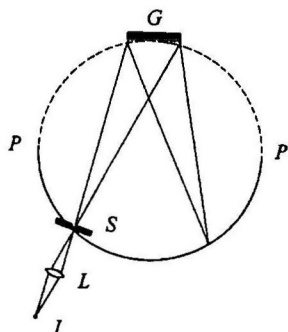


Рис. 1. Схема установки вогнутой решетки Пашена-Рунге: I – источник света, L – линза, S – щель, G – решетка, PP' – фокальная поверхность

Применение классических вогнутых дифракционных решеток не позволяет в полной мере использовать преимущества данной схемы и многоканального фотоэлектрического способа регистрации, так как вогнутые решетки обладают значительными aberrациями. Коррекция aberrаций может быть достигнута путем изготовления решеток с криволинейным штрихами и переменным периодом. Среди дифракционных решеток с коррекцией aberrаций наиболее широкими возможностями коррекции наряду с высокой технологичностью обладают вогнутые голограммные дифракционные решетки, записанные в негомоцентрических пучках (ВГДР 2-го поколения).

Во второй главе рассматриваются методы и средства проведения расчета параметров голографирования для записи ВГДР 2-го поколения, анализа качества изображения спектра и оптических схем спектрографов на их основе. Обоснована необходимость создания современного программного обеспечения для автоматизации расчетов.

Методы расчета оптических схем спектральных приборов с неклассическими дифракционными решетками основаны на минимизации отдельных членов разложения функции оптического пути вогнутой неклассической дифракционной решетки. Такую функцию называют также характеристической или абберационной функцией.

Характеристическая функция имеет вид:

$$V(y, z) = -yF_0 + \frac{y^2}{2r} F_1 + \frac{z^2}{2r} F_2 + \frac{y^3}{2r^2} F_3 + \frac{yz^2}{2r^2} F_4 + \frac{y^4}{8r^3} F_5 + \frac{y^2 z^2}{4r^3} F_6 + \frac{z^4}{8r^3} F_7. \quad (1)$$

Коэффициент  $F_1$  характеризует фокусировку лучей в меридиональной плоскости,  $F_2$  - в сагиттальной,  $F_3$  характеризует меридиональную кому,  $F_4$  - сагиттальную,  $F_5, F_6, F_7$  характеризуют абберации 3-го порядка.

Равенство

$$F_i = 0 \quad (2)$$

является условием коррекции абберации, характеризуемой этим коэффициентом.

Коэффициенты  $F_i$  для голограммной дифракционной решетки имеют вид:

$$F_i = M_i - \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_i, \quad (3)$$

где  $M_i$  содержат параметры схемы,  $H_i$  содержат параметры голографирования,  $\lambda_0$  - длина волны записи.

Для автоматизации проведения расчетов с использованием современной вычислительной техники был разработан пакет программ «VGDR» позволяющий определять конструктивные параметры монохроматоров и спектрографов, при различных наборах начальных данных, рассчитывать коэффициенты голографирования, находить параметры голографирования ВГДР (классических, записанных точечными источниками и 2-го поколения), переходить от них к параметрам нарезки и наоборот, определять абберационные характеристики ВГДР: классических, записанных точечными

источниками и 2-го поколения. Внешний вид интерфейса пакета программ «VGDR» представлен на рис. 2.

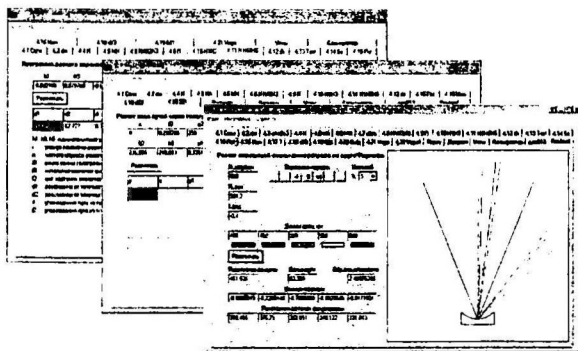


Рис. 2. Пакет программ «VGDR»

С помощью пакета программ «VGDR» была рассчитана оптическая схема спектрографа на круге Роуланда, предназначенного для эмиссионного анализа основных типов металлов, сплавов и почв (рис.3, таблица 1). В качестве диспергирующего элемента применена вогнутая дифракционная решетка с пространственной частотой 3600 штр/мм, диаметром 50мм и радиусом кривизны подложки 501,2 мм, работающая в -1 порядке дифракции.

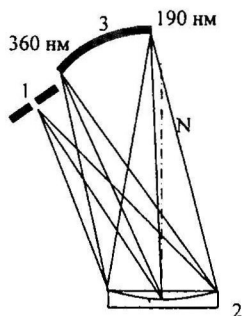


Рис. 3 Оптическая схема спектрографа на круге Роуланда: 1 – спектральная щель, 2 – вогнутая голограммная дифракционная решетка. 3 – кривая на которую фокусируется спектр

Анализ абберационных характеристик схемы спектрографа (рис.4) показал, что применение ВГДР 2-го поколения позволяет существенно улучшить качество изображения спектральных линий.

Таблица 1

$\lambda$ , нм	190	232,5	275	317,5	360
$\varphi'$ , рад	0,014870	0,168668	0,326647	0,493680	0,677529
$\varphi'$ , °	0,851985	9,663964	18,715510	28,285762	38,819528
$d'$ , мм	501,145	494,088	474,698	441,354	390,497

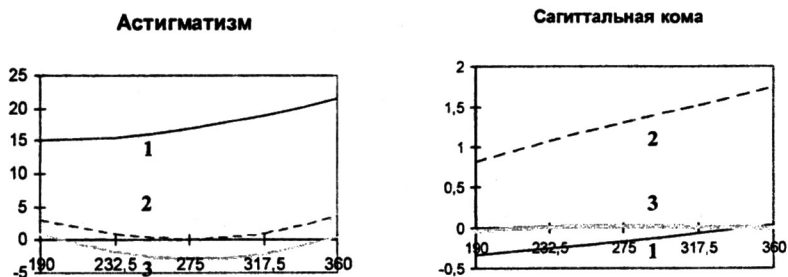


Рис. 4. Аберрации спектрографа с ВГДР различных типов: 1 - классическая ВГДР, 2 - ВГДР, записанная точечными источниками, 3 - ВГДР 2-го поколения

В частности, применение ВГДР 2-го поколения позволяет на порядок снизить значения сагиттальной комы и астигматизма относительно классической ВГДР, а относительно ВГДР, записанной точечными источниками на два порядка снизить значение сагиттальной комы при приблизительно равных значениях астигматизма.

Проведен расчет параметров голографирования для записи ВГДР 2-го поколения (таблица 2).

Таблица 2

$i_1$	$i_2$	$d_{m1}$	$d_{m2}$	$d_{s1}$	$d_{s2}$
1,141972	-0,748179	208,400	367,344	357,829	1392,020

Исследовано влияние погрешностей установки оптических элементов схемы записи ВГДР на аберрационные характеристики спектрального прибора, что позволило обосновать технические требования к голографической



установке для записи ВГДР 2-го поколения. Показано, что отклонение расстояний от расчетных значений сильнее всего влияет на величину сагиттальной комы. Кроме того, чем выше степень коррекции aberrаций удается достигнуть в схеме записи, тем жестче допуски на расстояния до источников голографирования. Также, к резкому ужесточению допусков приводит увеличение апертуры ВГДР.

В рассматриваемом случае для ВГДР 2-го поколения условия коррекции aberrаций выполняются при отклонении расстояний до источников голографирования от расчетных значений не более чем на 0,2 мм, допуск на угол между записывающими пучками при  $\Delta N=0,1\%$  составляет  $\approx 7$  угловых минут.

В третьей главе описана разработанная голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения, в которой интерферирующие пучки формируются с помощью цилиндрических зеркал, рассмотрены вопросы сборки, юстировки схем записи, изготовления и контроля ВГДР 2-го поколения (рис. 5).

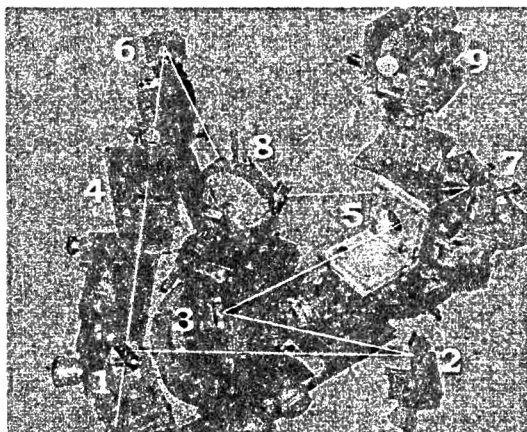


Рис. 5. Внешний вид голографической установки для записи голограммных дифракционных решеток 2-го поколения

Голографическая установка представляет собой массивную виброзащищенную плиту с размещенными на ней узлами крепления оптических элементов и юстировочными механизмами: делительным столом с установленным на нем узлом крепления подложки (8), узлами крепления цилиндрических зеркал (6,7), поворотными зеркалами (2,3), светоделителем (1) и двумя узлами крепления микрообъективов и точечных диафрагм (4,5).

Установка позволяет записывать ВГДР, как на круглых, так и на прямоугольных подложках размерами, не превышающими 70 мм, с пространственной частотой штрихов от 400 до 3600 шт/мм.

Для расчета технологических параметров голографической установки при юстировке схемы записи ВГДР 2-го поколения разработана специализированная программа, которая позволяет рассчитывать основные параметры схемы, создавать отчеты, необходимые для сборки схемы записи и ведения отчетности, автоматически рисовать эскиз, отображающий ход лучей в схеме, снижающий вероятность возникновения технологических ошибок в процессе юстировки схемы.

Разработана методика юстировки голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая размещение оптических элементов схемы записи с выполнением необходимых допусков к погрешностям установки. Методика юстировки основана на применении подложек, идентичных тем, на которых будут записываться ВГДР, с выгравированным крестом в центре рабочей поверхности. Суть методики заключается в совмещении изображений креста, полученных при отражении от подложки лазерного пучка, идущего в одном плече схемы, с лазерным пучком, идущим ему на встречу во втором плече.

Для контроля оптических характеристик дифракционных решеток разработан измерительный стенд (рис.6), использующий многоканальную фотоэлектрическую регистрирующую систему, сопряженную с персональным

компьютером и методика проведения измерений. Конструкция стенда позволяет контролировать плоские, вогнутые, отражательные и пропускающие дифракционные решетки.

Предложена новая методика калибровки измерительных стендов и макетов спектральных приборов по длинам волн с помощью узкополосных голограммных фильтров. Конструкция голограммного узкополосного фильтра защищена патентом РФ на изобретение.

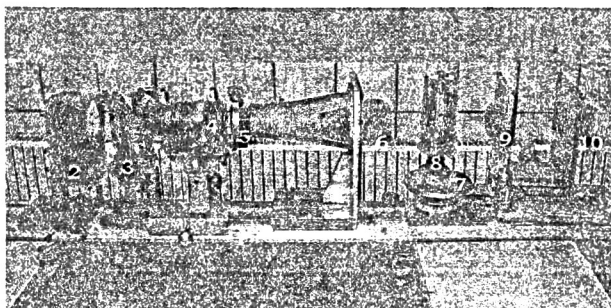


Рис. 6. Внешний вид измерительного стенда для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток

**Четвертая глава** посвящена математическому моделированию изображения спектра в спектрографе с ВГДР 2-го поколения, а также экспериментальной проверке оптических характеристик спектрографа с ВГДР различных типов и сравнению результатов теоретического расчета с экспериментальными данными.

Достоверность результатов расчетов абберационных характеристик спектрографа, проведенных с использованием пакета программ «VGDR» подтверждена результатами поверочных расчетов, выполненных в программе «626» (разработанной под руководством И.В. Пейсахсона, ГОИ, г. Санкт-Петербург).

На измерительном стенде для контроля оптических характеристик дифракционных решеток проведено макетирование оптической схемы

спектрографа с ВГДР 2-го поколения. Получены эмиссионные спектры ртути высокого качества.

На изготовленном макете спектрографа проведен сравнительный анализ спектров железа, полученных с помощью ВГДР 2-го поколения (рис. 7а, 8а), и классической ВГДР (рис. 7б, 8б), также приведены спектры, полученные на спектрографе ДФС-458 с нарезной неклассической решеткой (рис. 7в, 8в).

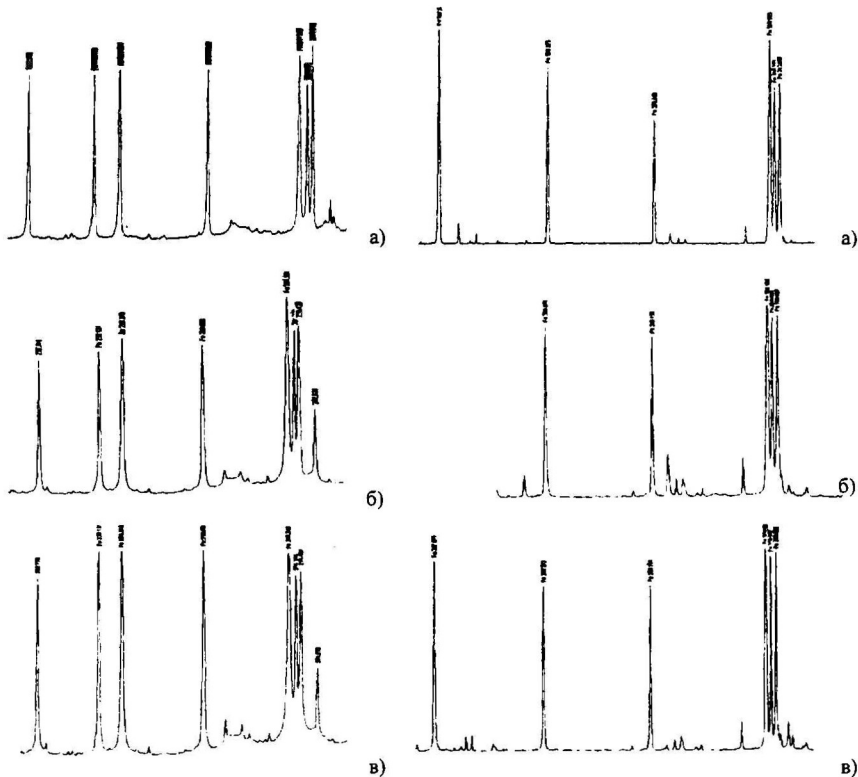


Рис. 7. Участки эмиссионного спектра железа в районе 233 нм

Рис. 8. Участки эмиссионного спектра железа в районе 310 нм

Проведенные экспериментальные исследования показали, что спектрограф с ВГДР 2-го поколения обладает хорошим качеством изображения

спектральных линий и значительно меньшим ( $\approx 5$  раз) астигматизмом. Ширина аппаратной функции составила  $\approx 27$  мкм по всему рабочему спектральному диапазону. По спектральному разрешению прибор не уступает серийному спектрографу ДФС-458, при существенно меньших (в 5-6 раз) массогабаритных характеристиках. Аберрационные характеристики хорошо согласуются с данными теоретического расчета.

Разработанная оптическая схема спектрографа также может быть использована для создания спектроскопической аппаратуры, предназначенной для проведения исследований в области вакуумного ультрафиолета и лазерной спектроскопии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ литературы, посвященной спектральному приборостроению и производству элементов дифракционной оптики показал, что ВГДР становятся основным диспергирующим элементом современных спектроанализаторов. Однако коррекционные возможности ВГДР 1-го поколения исчерпаны, дальнейшее повышение технических характеристик приборов возможно с применением ВГДР 2-го поколения.
2. Разработано программное обеспечение, включающее в себя:
  - комплекс программ **VGDR** для проведения расчетов оптических схем спектральных приборов и схем записи ВГДР,
  - программа расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения.
3. Рассчитаны оптическая схема эмиссионного спектрографа на круге Роуланда и схема записи ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм для него. Показано, что применение ВГДР 2-го поколения в данной

схеме позволяет одновременно уменьшить значения сагиттальной комы (на порядок) и астигматизма схемы ( $\approx 5$  раз).

4. Проведен анализ влияния погрешностей установки элементов схемы записи на абберационные характеристики ВГДР и теоретически обоснованы требования к погрешностям сборки и юстировки схем записи.
5. Разработана специализированная голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения и методика ее юстировки, обеспечивающие заданные технические требования и измерительный стенд для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток.
6. Впервые предложена методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных приборов при помощи узкополосных голограммных фильтров.
7. Изготовлена ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм. Экспериментальные исследования ВГДР 2-го поколения в схеме спектрографа хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов.

#### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- 1) Белокопытов А.А., Павлычева Н.К., Селезнев В.А. Получение голограммных дифракционных решеток в неомоцентрических пучках // Оптический журнал. -Том 74. -№3. 2007. -С.60-64.
- 2) Белокопытов А.А., Шакиров Н.Ф. Спектрограф с голограммной дифракционной решеткой второго поколения // Оптический журнал. -Т. 77. №8. 2010 г. -С.61-66.
- 3) Белокопытов А.А., Буйнов Г.Н., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры как эффективное средство защиты фотоприемных устройств приборов ночного видения от воздействия мощных лазерных пучков // Прикладная физика -№5. 2006. -с.113-115.

- 4) Белокопытов А.А. Голограммный фильтр. Патент РФ на изобретение №2376617 от 13.02.2008. Бюл. №35.
- 5) Белокопытов А.А. Спектрометр с голограммной дифракционной решеткой второго поколения. Сборник тезисов международной молодежной научной конференции "XVII Туполевские чтения", 26-28 мая 2009. г. Казань.
- 6) Белокопытов А.А., Буйнов Г.Н., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры как эффективное средство защиты фотоприемных устройств приборов ночного видения от воздействия мощных лазерных пучков // Тезисы докладов 18-ой международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения 25-28 мая 2004 г. -М. -с.148.
- 7) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г. Исследование люминесцентных свойств голограммных узкополосных фильтров на основе БХЖ // Международная конференция "Прикладная оптика" 18-22 октября 2004 г. - Санкт-Петербург. -Сборник трудов. -Том II. -с. 237
- 8) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Шигапова Н.М. Установки для регистрации отражательных голограмм // Сборник трудов международной конференции "Оптика 2007" 15-19 октября 2007 г. Санкт-Петербург.
- 9) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Лукин А.В., Сидорова Т.Б., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры (Notch-filters) с предельно высокой оптической плотностью для подавления мощных лазерных пучков в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Особенности изготовления и аттестации // Сборник тезисов докладов международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения. 11-14 марта 2008г. -Саров. –с.209-212.
- 10) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Любимов А.И., Шигапова Н.М. Notch-фильтры как средство защиты от лазерного излучения // Сборник материалов XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. -Часть 2. -Казань 13-15 мая 2008. -С. 275.

---

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ.л. 1,25. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,0.  
Тираж 100. Заказ Н 161.

---

Типография Издательства Казанского государственного  
технического университета  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10









